Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics, 36, 1, 2024. (59-76)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

Society of Manufacturing Engineering of Iran

Prediction of High-Cycle Fatigue Life with Variable Loading Amplitude Using Thermography Method

Research Article

Mahmoud Shariati[1], Mohammad Keshtgar[2], Khalil Farhangdoust[3]

DOI: 10.22067/jacsm.2023.83002.1189

1- Introduction

Mechanical components are susceptible to microcracks under cyclic fatigue loading. Estimating the life of crack initiation is very important for the maintenance period. Investigating cyclic fatigue failure shows that this phenomenon begins with the occurrence of microcracks and their growth under the influence of cyclic stress.

One of the most important challenges in fatigue analysis is the "life estimation" of components because the damage in high-cycle fatigue occurs at much lower stresses than yielding stress. Moreover, on a microscopic scale, the nucleation of microcracks occurs in the defects and dislocations of the material, and even when the damage is growing, no sign of failure is observed. By examining the presented fatigue models, it can be said that one of the most efficient methods for evaluating fatigue damage is using the continuum damage mechanics method. By using this method, in addition to obtaining the damage and evaluating the life of the specimen under fatigue loading, it is possible to consider the effect of loading history and loading sequence in cases where fatigue loading with variable amplitude is applied. In high-cycle fatigue, most of the mechanical energy is converted into heat, and the internal energy created in the material under fatigue loading can be ignored. To extract heat-dissipated energy, it is enough to obtain mechanical energy.

2- Finite Element Analysis

The model used in this study is based on Eq. (15), where sequence and loading history are considered two effective features in the fatigue damage model.

$$D_i = \frac{-1}{\ln(\frac{E_c}{d_i})} \ln(1 - \frac{(n_{i-1,e} + \Delta n_i) d_i}{E_c}) \qquad (15)$$

In addition, the amount of damage in the (i-1)th loading block will be according to Eq. (16).

$$D_{i-1} = \frac{-1}{\ln(\frac{E_c}{d_{i-1}})} \ln(1 - \frac{(n_{i-1,e}) d_i}{E_c}) \qquad (16)$$

Eq. (15) shows the damage r d to lo din blocks with variable amplitude, where E_C ers t critical heat lo t the time of failure, d_i and d_{i-1} are the dissipat nergy per fa gue ycle in loading block (i) and (i-1)th, Δn_i indicates th per of cycles passed n the)th loading block, $n_{i-1,e}$ represents the equi lent per of cycles before the (i)th loading block, and D_i and D_{i-1} respectively, the damage at the end is the (i)th and (i-1)th loading blocks. Based on these two equations, to obtain the damage at the end of the (i)th loading block, it is sufficient to consider the loading amplitude of the block before i is equal to the loading amplitude of the (i)th loading k and the number of cycles equivalent to the damage D_{i-1}. Using Eq. (16), the number of equivalent cycles can be obtained according to Eq. (17).

$$n_{i-1,e} = \frac{E_c}{d_i}\left[1 - \exp\left(-D_{i-1} \ln\left(\frac{E_c}{d_{i-1}}\right)\right)\right] \qquad (17)$$

According to Fig 5., to analyze stress and strain, and extract the heat dissipated energy in each cycle, the UMAT subroutine has been used. In this subroutine, in each time increment, the Jacobian matrix is obtained based on the material's properties and then, stress, strain, strain energy density, and damage parameters are retrieved according to Eq. (15) at each integration point. After the time increment reaches the end of the step, first, the modulus of elasticity is modified and the processes of the previous time step are repeated and updated. It is not possible to create an unlimited number of steps. Therefore, the cyclic jump technique has been used in this article, and the strain energy created after that cycle number will be obtained by multiplying each cycle jump by the strain energy density at the end of each step urthermore, the UMATHT subroutine is used to ol n the temperature at each integration point, so that Δw_i obtained from the UMAT subroutine is considered the volumetric energy produced in the heat diffusion equation.

*Manuscript received: June 18, 2023. Revised, September 19, 2023, Accepted, December 29, 2023.

[1] Corresponding author. Professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University, Mashad, Iran.
Email: mshariati44@um.ac.ir.

[2] Ph.D. Candidate, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University, Mashad, Iran.

[3] Professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University, Mashad, Iran.

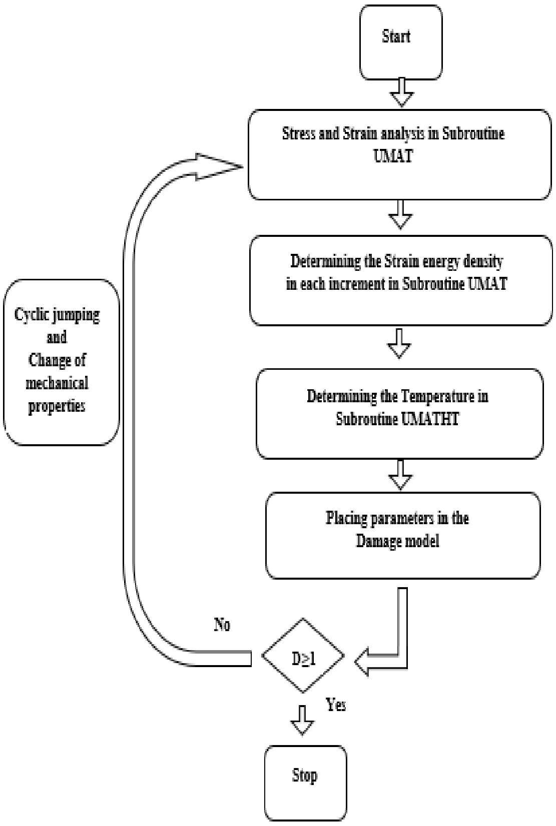


Fig 5. Algorithm of analysis

3- Results

As mentioned, the introduced model can predict the variable amplitudes of fatigue life. According to Table 4, assuming that the number of cycles is constant in the amplitude of 220 MPa, the results show that the life decreases with the increase of the amplitude from 190 to 210 MPa in the second loading block.

Table 4. Number of cycles in each block in variable amplitude fatigue loading

$\Delta\sigma_1$ (MPa)	$\Delta\sigma_2$ (MPa)	Δn_1 (Cycle)	Δn_2 (Cycle)
220	190	2×10^5	5.2×10^5
220	200	2×10^5	2.8×10^5
220	210	2×10^5	1.8×10^5

One of the features of this model is to consider the history of loading. In Table 5, the places of the first and second loading blocks have been changed and it is assumed that the number of cycles in the first loading block is according to the fourth column of Table 4. As shown in Table 5, the number of cycles spent in the second loading block with an amplitude of 220 MPa is the same for different fatigue loading amplitudes. Table 6 shows that the damage caused at the end of the second loading block changes by shifting the loading blocks, indicating the sensitivity of the introduced damage model to the history and sequence of loading. Moreover, the results show that if the loading block with a higher amplitude is applied first followed by the loading block with a lower amplitude, the caused damage will be less compared to the opposite case.

Table 5. Number of cycles in each block in variable amplitude fatigue loading

$\Delta\sigma_1$ (MPa)	$\Delta\sigma_2$ (MPa)	Δn_1 (Cycle)	Δn_2 (Cycle)
190	220	5.2×10^5	1.83×10^5
200	220	2.8×10^5	1.83×10^5
210	220	1.8×10^5	1.83×10^5

Table 6. Number of cycles in each block in variable amplitude fatigue loading

$\Delta\sigma_1$ (MPa)	$\Delta\sigma_2$ (MPa)	Δn_1 (Cycle)	Δn_2 (Cycle)	Damage
220	200	2×10^5	2×10^5	1.51×10^{-1}
200	220	2×10^5	2×10^5	2.61×10^{-1}
220	190	2×10^5	2×10^5	8.23×10^{-2}
190	220	2×10^5	2×10^5	1.56×10^{-1}
220	210	1×10^5	1×10^5	5.90×10^{-2}
210	220	1×10^5	1×10^5	6.55×10^{-2}

4- Conclusion

In this article, the life of metals under fatigue loading with variable amplitude was investigated. For this purpose, the continuum damage mechanics method is used to model the damage parameter, in which the amount of dissipated energy in each cycle per volume is known as the damage index. According to Table 4, assuming that the number of cycles is constant in the amplitude of 220 MPa, the results show that the life decreases with the increase of the amplitude from 190 to 210 MPa in the second loading block. Table 6 demonstrates that the damage caused at the end of the second loading block changes by shifting the loading blocks, which shows the sensitivity of the introduced damage model to the history and sequence of loading. Furthermore, the results showed that if the loading block with a higher amplitude is applied first and then, the loading block with a lower amplitude is applied, less damage will be caused than in the opposite case.

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک
http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

پیش‌بینی عمر خستگی پرچرخه تحت بارگذاری دامنه متغیر با استفاده از روش ترموگرافی*

مقاله پژوهشی

محمود شریعتی [(۱)] محمد کشت‌گر [(۲)] خلیل فرهنگ‌دوست [(۳)]

DOI: 10.22067/jacsm.2023.83002.1189

چکیده در این مقاله عمر فلزات تحت بارگذاری خستگی با دامنه متغیر مورد بررسی قرار گرفته است. به همین منظور از روش مکانیک آسیب پیوسته برای مدل‌سازی پارامتر آسیب بهره گرفته شده که در آن میزان انرژی اتلافی در هر سیکل در واحد حجم به‌عنوان شاخص آسیب شناخته می‌شود. مدل آسیب معرفی‌شده در این مقاله توانایی استفاده در مسائل با دامنه متغیر را دارد، به همین دلیل در این مطالعه یک نمونه از جنس فولاد Q۲۳۵، در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی و از دو زیر روال UMAT و UMATHT برای استخراج هم‌زمان انرژی اتلافی در هر سیکل و دما مربوط به آن استفاده شده است. به منظور بررسی عمر خستگی تحت بارگذاری دامنه متغیر، دو بلوک بارگذاری با دامنه‌های مختلف در نظر گرفته شده است. حالات مختلفی برای این دو بلوک بارگذاری در نظر گرفته شده است که نتایج آن‌ها نشان می‌دهد مدل آسیب معرفی‌شده حساسیت بالایی نسبت به تاریخچه و توالی بارگذاری دارد؛ همچنین مطابقت خوبی بین نتایج این پژوهش و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد.

واژه های کلیدی عمر خستگی پرچرخه، روش مکانیک آسیب، شاخص آسیب، میزان انرژی اتلافی در هر سیکل، ترموگرافی.

Prediction of High Cycle Fatigue Life with Variable Loading Amplitude using Thermography Method

Mahmoud Shariati Mohammad Keshtgar Khalil Farhangdoust

Abstract *In this article, the life of metals under fatigue loading with variable amplitude has been investigated. For this purpose, the continuum damage mechanics method is used to model the damage parameter, in which the amount of dissipated energy in each cycle per volume is known as the damage index. The damage model introduced in this article has the ability to be used in problems with variable amplitude, therefore, in this study, a specimen of Q235 steel was simulated in Abaqus software and from two subroutines UMAT and UMATHT to simultaneously extract dissipated energy in Each cycle and its corresponding temperature were used. In order to investigate the fatigue life under variable amplitude loading, Two blocks with different amplitudes have been considered. Different types have been considered for these two blocks, and their results show that the introduced damage model has a high sensitivity to the loading history and sequence; Also, there is a good agreement between the results of this research and the experimental results.*

Key Words High cycle fatigue, Continuum damage mechanic, Damage index, Dissipated energy in each cycle.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۳/۲۸ تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۹/۵ می‌باشد.
(۱) نویسنده مسئول، استاد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی ، مشهد، ایران. **Email**: mshariati44@um.ac.ir .
(۲) دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.
(۳) استاد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

مقدمه

قطعات مکانیکی در بارگذاری خستگی پرچرخه مستعد بروز ریزترک‌ها هستند. ارزیابی و پیش‌بینی زمان شروع ترک در این قطعات، برای بازدیدهای دوره‌ای و برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری آن‌ها، از اهمیت شایانی برخوردار است. بررسی پدیده شکست خستگی پرچرخه نشان می‌دهد این پدیده با وقوع ریزترک‌ها آغاز و تحت تأثیر تنش‌های نوسانی رشد می‌کند.

یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در تحلیل خستگی «تخمین عمر» قطعات است؛ چرا که آسیب در خستگی پرچرخه در تنش‌هایی به مراتب کمتر از تنش‌های تسلیم اتفاق می‌افتد؛ همچنین در مقیاس میکروسکوپی، جوانه‌زنی ریزترک‌ها در عیوب و نابه‌جایی‌های ماده رخ می‌دهد و حتی هنگام رشد آسیب نیز، هیچ نشانه‌ای از شکست دیده نمی‌شود.

مطالعات پیشین

مبانی کلی شکست نرم

شکست در فلزات به صورت دو دسته کلی شکست نرم و ترد رخ می دهد. با توجه به ساختار بلوری فلزات، درجه حرارت، میزان نیرو، نرخ بارگذاری و ابعاد قطعه یکی از این نوع شکست‌ها رخ می‌دهد. از مشخصات شکست نرم می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد: گلویی شدن موضع شکست تحت تأثیر تنش کششی، یا نازکی موضعی و ایجاد حفره‌های بسیار ریز در درون قسمت گلویی، اتصال آن‌ها به یکدیگر تا رسیدن به حد یک ترک ریز و رشد آرام ترک تا حد پارگی یا شکست نهایی است در شکست نرم، در ناحیه گلویی ابتدا حفره‌های ریز جوانه می‌زنند و سپس این حفره‌ها رشد می‌کنند و به هم می‌پیوندند و گسیختگی ایجاد می‌شود. با تکرار این جوانه‌زنی حفره‌ها و پیوستن آن‌ها به یکدیگر، خرابی رشد می‌کند و پس از رسیدن به میزان بحرانی، سرعت رشد خرابی و آسیب افزایش می‌یابد و باعث ایجاد شکست نهایی می‌شود. توانایی پیش‌بینی شروع خرابی، از مسائل مهم این حوزه است [1].

برای بررسی آن معمولا سه روش کلی وجود دارد که عبارتند از:

الف) معیار شکست ناگهانی: بر مبنای این روش، خرابی زمانی رخ می‌دهد که یک متغیر خارجی که غیرکوپل با متغیرهای داخلی است، به مقدار بحرانی خود برسد.

ب) رفتار پلاستیک مواد متخلخل: این روش ماده را به صورت ماده متخلخل فرض می‌کند و آسیب بر مبنای میزان و سرعت به هم‌پیوستگی حفره‌ها بیان می‌شود.

ج) مکانیک آسیب پیوسته: در این روش فرض بر این است که خرابی یک پارامتر داخلی است که به صورت یک فرایند برگشت‌ناپذیر در ساختار میکروماده اتفاق می‌افتد.

یکی از کارامدترین روش‌ها برای ارزیابی آسیب خستگی استفاده از روش مکانیک آسیب است که در ادامه به صورت کامل توضیح داده شده است. با استفاده از این روش ضمن به دست آوردن میزان آسیب و ارزیابی عمر نمونه تحت بارگذاری خستگی، می‌توان اثر تاریخچه بارگذاری و توالی بارگذاری را در مواردی که بارگذاری خستگی با دامنه متغیر اعمال می‌شود، در نظر گرفت.

روش مکانیک آسیب

این روش برای شناسایی خستگی و نشان دادن خرابی‌های داخلی قبل از پدید آمدن ترک‌های ماکروسکوپی ارائه شد و رفتار مکانیکی در مقیاس ماکرو سکوپی و تجمع و رشد خرابی را تا زمانی که به حد بحرانی برسد مورد بررسی قرار می‌گیرد [2,3].

این مدل برای اولین بار توسط کاچانوف ارائه و متغیرهای آسیب واحدی برای اندازه‌گیری ترک‌ها و حفره‌ها تعریف شد. لمتق و چبوش، روش‌های بنیادین در مکانیک آسیب پیوسته ارائه دادند که در ادامه توضیح داده می‌شوند [4]. شیاوو مدل مکانیک آسیب پیوسته برای خستگی پرچرخه را ارائه داد و نتایج خوبی بین پیش‌بینی عمر خستگی و مدل آزمایشگاهی به دست آورد [3].

آسیب یک کاهش تدریجی در خواص ماده است که به علت ایجاد و رشد حفره‌های کوچک و نقص‌ها حاصل می شود. در روش مکانیک آسیب پارامتر آسیب D مطابق رابطه (۱) برای نشان دادن چگالی سطح ریزترک‌ها و حفره‌ها در هر صفحه از واحد حجم معرفی می‌شود.

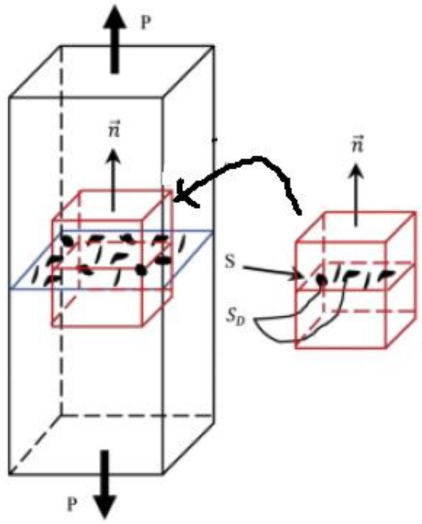
$$D = \frac{S - \bar{S}}{S} \qquad (۱)$$

در رابطه (۱) و مطابق شکل (۱) ، S ناحیه بدون آسیب، S_D سطح آسیب‌دیده و $\bar{S}$ ناحیه مؤثر که توانایی تحمل بارگذاری را دارد، می‌باشد. اگر P نیروی وارد شده بر سطح باشد، آن‌گاه تنش

عمودی بر این سطح مطابق رابطه (۲) تعریف می‌شود. همچنین در المانی که تحت آسیب قرار گرفته است، سطح آسیب‌دیده، ظرفیت بارپذیری خود را از دست می‌دهد؛ لذا سطح مؤثر بارگذاری سطح $\bar{S}$ می‌باشد. بنابراین تنش مؤثر به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\bar{\sigma} = \frac{P}{\bar{S}} = \frac{P}{S(1-D)} \quad (۲)$$

در مورد کرنش این‌گونه فرض می شود که تنها اثر آسیب بر کرنش، از طریق تنش مؤثر اعمال می شود، در واقع رفتار کرنش در مواد آسیب‌دیده مشابه قطعات سالم است، با این تفاوت که تنش با تنش مؤثر جایگزین می‌شود.



شکل ۱ تعریف پارامتر آسیب

روش‌های مستقیم اندازه‌گیری شکل‌گیری ترک‌ها، فضاهای خالی و آسیب کار دشواری است، لذا بهتر است از روش‌های ماکروسکوپی استفاده گردد. وقتی کرنش پلاستیک رخ می‌دهد، خرابی می‌تواند با کاهش مدول الاستیک بعد از هر چرخه بیان شود. بنابراین متغیر آسیب با ارتباط بین مدول الاستیک باربرداری و مدول الاستیک اولیه محاسبه می‌شود. مطابق این روش، اگر E مدول الاستیسیته ماده سالم و D پارامتر آسیب، مدول الاستیسیته ماده دارای خرابی ($\bar{E}$) از رابطه (۳) قابل محاسبه است [5].

$$\bar{E} = (1-D)E \quad (۳)$$

مطالعات متعددی در راستای استفاده از روش مکانیک آسیب پیوسته انجام شده است. چاندرخان و پاندی [6] یک مدل ایزوتروپیک آسیب پیوسته در چارچوب متغیرهای داخلی تئوری ترمودینامیک پیشنهاد کردند. این مدل آسیب بر اساس تنش مؤثر و اصول کرنش معادل بنا شده است. این مدل تغییرات غیر خطی را با توجه به کرنش پلاستیک نشان می‌دهد. صحت‌سنجی این مدل با استفاده از نتایج آزمایشگاهی آلیاژ آلومینیوم انجام شد. اشکال این مدل پیچیدگی زیاد آن و استفاده از پارامترهایی است که محاسبه آن‌ها تجربی است و روش مشخصی برای تعیین آن‌ها توسط نویسندگان ارائه نشده است.

بنورا [7] مدلی غیر خطی را بر اساس مشاهدات تجربی توسعه داد، که نشان می‌داد رشد حفره‌ها، نتیجه آسیب غیر خطی همراه با تغییر شکل پلاستیک است. این مدل نشان می‌دهد در هنگام تغییرشکل‌های پلاستیک، تابع توزیعی برای پتانسیل شکست وجود دارد که تابعی غیرخطی بر حسب مجموع کرنش مؤثر پلاستیک است. همچنین این مدل بعدا برای تشریح اثر تنش سه محوره برای پیش بینی شکست نرم در فولاد A533 توسعه داده شد.

مکانیک آسیب پیوسته برای شکست خستگی نیز، در جایی که تغییر شکل پلاستیک نقش اصلی در ایجاد خرابی و گسیختگی دارد، قابل تعمیم است. بنورا [8] مدل غیر خطی آسیب را برای بارگذاری‌های سیکلی تعمیم داد. مزیت اصلی مدل ارائه شده توسط بنورا، محاسبهٔ پارامترهای مدل پیشنهاد شده با استفاده از نتایج آزمایش کشش یا بارگذاری سیکلی است.

با توجه به اینکه برخی از مواد با توجه به ماهیت خود دارای رفتار غیرایزوتروپیک هستند، بررسی شکست و گسیختگی نرم در این مواد نیز مورد توجه محققان بوده و مدل هایی برای پیش‌بینی رفتار این مواد در شکست نرم ارائه شده است [9].

مشایخی و ضیایی راد [10] از یک فرایند تجربی فولاد برای تعیین متغیرهای شکست فولاد A533 استفاده کردند. آن‌ها یک مدل آسیب الاستو-پلاستیک را در نرم‌افزار آباکوس توسعه دادند. سپس این مدل را برای شبیه‌سازی رفتارگسیختگی نرم بر روی قطعه شیاردار به کار گرفتند. متغیرهای آسیب حاصل در شبیه‌سازی قطعه تحت تست فشار مورد استفاده قرار گرفت. آن‌ها نیروهای عکس‌العملی و بار بحرانی برای شروع ترک را محاسبه و با مقدار حاصل از آزمایش مقایسه کردند.

تاکر و پاندی [11] یک مدل برای تغییرات آسیب پیوسته

ایزوتروپیک در چهار چوب متغیرهای داخلی ترمودینامیک ارائه دادند. این مدل بر اساس اصول تنش مؤثر و کرنش معادل است.

از آنجا که خستگی در بیشتر موارد به صورت یک پدیده چند محوری است، بنابراین یکی از بهترین شاخص‌ها برای بررسی خستگی استفاده از انرژی، به‌عنوان شاخص آسیب خستگی، می‌باشد. در مطالعه حاضر از میزان گرمای اتلافی در هر سیکل بهره گرفته شده است. بیشتر شاخص‌های آسیب مورد استفاده در مطالعات پیشین توانایی در نظر گرفتن اثر رفتار ریزساختار ماده را ندارند، اما استفاده از میزان گرمای اتلافی در هر سیکل، به دلیل وابستگی این شاخص به دمای نمونه، این مشکل را برطرف کرده است. در ادامه به‌طور کامل شاخص مورد استفاده در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است.

مدل‌های انباشت آسیب در خستگی

بیشتر اجزای مکانیکی در معرض بارگذاری خستگی و تجمع آسیب ناشی از این نوع بارگذاری هستند. از این رو انباشت آسیب خستگی و پیش‌بینی عمر مفید قطعات در طراحی سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مفهوم محاسبه خستگی تجمعی به دهه ۱۹۲۰ برمی‌گردد [12]. سپس در سال ۱۹۴۵ فرضیه مشابهی توسط ماینر فرمول‌بندی شد که امروزه به‌طور گسترده با عنوان قاعده پالمگرن- ماینر، قانون آسیب خطی، شناخته می‌شود [13]. بر اساس این قاعده آسیب ناشی از خستگی برابر با نسبت چرخه انباشت است که به صورت رابطه (۴) بیان می‌شود.

$$D = \sum \frac{N_i}{N_f} \qquad (۴)$$

در رابطه (۴)، N_i تعداد سیکل گذرانده شده، N_f تعداد سیکل بارگذاری تا وقوع شکست در هر بلوک بارگذاری خستگی و D میزان آسیب انباشته شده تحت بارگذاری خستگی می‌باشد.

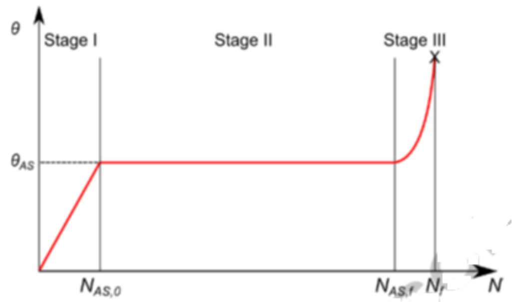
این قاعده، به دلیل سادگی، در استانداردهای صنعتی به منظور طراحی خستگی سازه‌های فلزی مورد استفاده قرار گرفته است. شوتز [14] طی مطالعه خود نشان داد که اختلاف زیادی بین طول عمر به دست آمده از آزمایش و عمر پیش‌بینی شده توسط قاعده ماینر وجود دارد. در قاعده ماینر اثر توالی بار و تاریخچه بارگذاری در نظر گرفته نشده است و این موضوع باعث ایجاد اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از قاعده ماینر می‌شود.

در طول سال‌ها، تلاش‌های زیادی برای بهبود پیش‌بینی آسیب به دست آمده از قاعده ماینر صورت گرفته است. برای مثال مارکو و استارکی [15] یک فرمول آسیب غیرخطی را برای اولین بار با استفاده از یک تابع نمایی برای توضیح اثر توالی بارگذاری بر عمر خستگی پیشنهاد کردند. چنگ و پلامتری [16] از اصول مکانیک آسیب پیوسته برای توسعه یک مدل انباشت غیرخطی استفاده کردند. فاطمی و یانگ [17] قانون ماینر را اصلاح کردند تا دقت پیش‌بینی آسیب را بهبود ببخشند. مائو و همکارش [18] مدلی را برای فرایند تکامل آسیب ایجاد کردند تا کاهش خواص مکانیکی در فرایند خستگی را کمی‌سازی کنند. کرایزر و همکاران[19] یک روش انرژی برای پیش‌بینی عمر خستگی با استفاده از انرژی کرنشی به‌عنوان پارامتر اصلی آسیب ایجاد کردند. امیری و خوانساری [20] و نادری و همکاران [21] عمر خستگی را با استفاده از رویکرد ترمودینامیکی بر اساس تولید آنتروپی تجمعی به دست آوردند، آن‌ها فرض کردند که تکامل آسیب تحت بارگذاری خستگی مستقیما با تولید آنتروپی مرتبط است. در مطالعات ژی‌کیانگ و همکاران [22]، ابتدا یک مدل غیر خطی معرفی و پس از آن، مدل اصلاح‌شده انباشت آسیب خستگی غیرخطی ارائه شده است که اثرات متقابل بار را محاسبه می‌کند. مدل اصلی مبتنی بر تخریب خواص فیزیکی مواد است که در آن اثرات اندرکنش بار نادیده گرفته می‌شود؛ با این حال، اثرات متقابل بار تأثیر قابل توجهی بر عمر خستگی دارد. در مدل اصلاح شده، با تجزیه و تحلیل چند مدل آسیب، یک پارامتر اندرکنش بار به دست آمده و به مدل اصلی اضافه شده است. همچنین در مطالعه آیران [23] یک مدل آسیب خستگی جدید ارائه شده است که مبتنی بر پارامترهای معمول منحنی S-N مواد است و نیازی به تعیین پارامتر مادی اضافی یا اصلاح منحنی S-N ندارد. مدل پیشنهادی در مطالعه آن‌ها در اتصالات جوشی لب به لب و فیلت مورد استفاده قرار گرفته و عمر خستگی پیش‌بینی شده مطابقت بهتری با نتایج تجربی در مقایسه با مدل‌های قبلی نشان می‌دهد.

مبانی تئوری مدل آسیب

رفتار دمایی نمونه تحت بارگذاری خستگی

مطابق شکل (۲) در طول فرایند خستگی، نمودار دما نسبت به عمر خستگی دارای سه فاز است که در فاز نخست با شروع بارگذاری خستگی دما افزایش می‌یابد. پس از گذشت تعداد محدودی چرخه، انرژی تلف شده و تلفات ناشی از تبادل حرارت بین نمونه و محیط به حالت تعادل می‌رسد (فاز II). نکته قابل توجه این است که بیشتر عمر خستگی در ناحیه دمایی مربوط به فاز II می‌باشد، به طوری که می‌توان کل عمر نمونه را تحت بارگذاری خستگی، در فاز II در نظر گرفت. پس از طی فاز دوم افزایش دما مجددا شروع‌شده و شیب نمودار دما نسبت به عمر خستگی افزایش می‌یابد. در این مرحله ماکرو ترک‌ها ایجاد می‌شوند و پس از طی چند سیکل قطعه دچار شکست می‌شود [20].



شکل ۲ رفتار دمایی فلزات تحت بارگذاری خستگی [20]

به طور کلی روش‌های حرارتی بر اساس پدیده خودگرمایی یک نمونه فلزی در بارگذاری خستگی است. بر اساس مکانیزم خودگرمایی، روش‌های حرارتی را می‌توان به طور کلی به دسته‌های زیر تقسیم‌بندی کرد.

الف) روش‌های حرارتی که مستقیما دما از روی سطح نمونه اندازه‌گیری می‌شود و به عنوان شاخص خستگی در نظر گرفته می‌شود [24,25].

ب) روش‌های حرارتی با پردازش سیگنال به منظور ارزیابی مؤلفه‌های آن [26].

ج) روش‌های حرارتی مبتنی بر آنتروپی به دست آمده از اندازه‌گیری دمای سطح [21].

د) روش‌های حرارتی مبتنی بر اتلاف گرمای ویژه در هر سیکل [27].

در حال حاضر بیشتر روش‌های ترموگرافی به شرایط خستگی پرچرخه محدود می‌شوند و تنها تعداد کمی مطالعه برای شرایط خستگی کم چرخه قابل استفاده هستند.

معرفی شاخص آسیب

به‌طور کلی خستگی یک پدیده اتلافی شامل تجمع آسیب هست. در فلزات، در رژیم‌های خستگی کم‌چرخه و پرچرخه، تغییر شکل‌های پلاستیک برگشت‌ناپذیر مسئول پدیده شروع ترک و رشد ترک هستند. شروع تغییر شکل‌های پلاستیکی غیرقابل‌برگشت در طول آزمایش خستگی به این معنی است که مقداری تبادل انرژی در طول یک سیکل خستگی ایجاد شده است. از کل انرژی صرف شده برای ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک مکرر در واحد حجم، بخشی از آن به صورت انرژی داخلی انباشته و قسمت باقی‌مانده به صورت گرما به اطراف پخش می‌شود. به طور دقیق‌تر در رژیم خستگی کم‌چرخه مقدار انرژی داخلی ذخیره شده در ماده تقریبا برابر انرژی است که به صورت گرما تلف می‌شود؛ در حالی که در خستگی پرچرخه بیشتر انرژی مکانیکی به گرما تبدیل می‌شود. در مطالعات اخیر از انرژی اتلاف شده در هر سیکل در واحد حجم به عنوان شاخص آسیب استفاده شده است. برای دستیابی به این شاخص لازم است از معادله تعادل انرژی استفاده شود که در ادامه به آن پرداخته می‌شود [27,29].

از آنجا که انرژی داخلی ذخیره شده در ماده مسئول تجمع آسیب ناشی از خستگی است، تکنیک‌های خاصی برای استخراج آن به عنوان تفاوت بین انرژی مکانیکی مصرف شده و انرژی آزاد شده به عنوان گرما پیشنهاد شده است. با وجود اینکه این رویکرد از دیدگاه تجربی جذاب است، اما در رژیم خستگی پرچرخه بیشتر انرژی مکانیکی به گرما تبدیل می‌شود و انرژی درونی ذخیره شده که از اختلاف انرژی مکانیکی و گرما به دست می‌آید با عدم قطعیت‌های زیادی روبه‌رو می‌شود. به‌منظور تخمین انرژی گرمایی ویژه، از معادله تعادل انرژی مطابق رابطه (۵) استفاده می‌شود. در این معادله W انرژی مکانیکی در هر سیکل در واحد حجم ماده که بخشی از آن به گرما (Q) تبدیل و بخش دیگر آن به تغییر در انرژی داخلی (ΔU) منجر می‌شود.

$$W = Q + \Delta U \tag{۵}$$

در معادله (۵) انرژی مکانیکی در هر سیکل مطابق رابطه (۶) و تغییرات انرژی داخلی از رابطه (۷) به دست خواهد آمد.

$$W = \oint \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \quad (۶)$$

$$\Delta U.f = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \dot{E}_P \quad (۷)$$

در معادله فوق $\dot{E}_P$ نرخ تجمعی انرژی آسیب، c گرمای ویژه، ρ چگالی و $\frac{\partial T}{\partial t}$ تغییرات دما نسبت به زمان می‌باشد. بر اساس معادلات فوق، معادله تعادل انرژی در نهایت به فرم رابطه (۸) تبدیل خواهد شد.

$$W.f = H + \rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \dot{E}_P \quad (۸)$$

در معادله (۸)، H توان گرمایی در هر نقطه از ماده است که می‌تواند در قالب فرایندهای رسانش، تشعشع و جابه‌جایی منتقل شود.

همان طور که در شکل (۲) نشان داده شده است پس از زمان معینی از آغاز آزمایش خستگی، دما ثابت خواهد شد؛ به عبارت دیگر بخش عمده‌ای از کار اعمال شده در یک سیکل در واحد حجم ماده به گرما تبدیل می‌شود و تغییرات دما در واحد زمان به صفر می‌رسد؛ بنابراین تغییرات انرژی داخلی در هر سیکل فقط وابسته به پارامتر $\dot{E}_P$ می‌باشد که بر اساس رابطه (۹) از اختلاف بین انرژی مکانیکی در واحد حجم و انرژی گرمایی منتقل شده به محیط در ناحیه تعادل دمایی به دست خواهد آمد؛ بنابراین معادله تعادل انرژی در فاز تعادل دمایی به صورت رابطه (۹) به دست خواهد آمد [27].

$$W.f = H + \dot{E}_P \quad (۹)$$

همان طور که گفته شد در خستگی پرچرخه بیشتر انرژی مکانیکی به گرما تبدیل می‌شود و می‌توان از مقدار انرژی درونی ایجاد شده در ماده تحت بارگذاری خستگی صرف نظر کرد؛ بنابراین مطابق رابطه (۹) برای استخراج میزان انرژی حرارتی اتلافی، کافی است مقدار انرژی مکانیکی را به دست آورد.

مدل پیشنهادی برای ارزیابی عمر خستگی بر اساس مقدار انرژی اتلافی در هر سیکل بارگذاری

دویی و ژنلین [15] یک فرمول آسیب برای تجزیه و تحلیل و تکامل آسیب خستگی ایجاد کردند. آن‌ها از کاهش انرژی کرنش پلاستیک در هنگام شکست خستگی برای ایجاد پارامتر آسیب تعریف شده به صورت رابطه (۱۰) استفاده کردند.

$$D = -\frac{D_{n_f-1}}{\ln(N_f)} \ln(1 - \frac{n}{N_f}) \quad (۱۰)$$

که در رابطه (۱۰)، D_{n_f-1} معرف مقدار آسیب بحرانی است که به شکل رابطه (۱۱) ارائه شده است.

$$D_{n_f-1} = 1 - \frac{\sigma^2}{2EU_{T0}} \quad (۱۱)$$

در رابطه (۱۱)، E مدول الاستیک، σ دامنه تنش سیکلی و U_{T0} چقرمگی استاتیکی در ماده بدون آسیب می‌باشد.

لیاقت و خونساری با فرض اینکه در طیف گسترده‌ای از بارگذاری‌های خستگی $D_{n_f-1} \approx 1$ است رابطه (۱۰) را مطابق رابطه (۱۲) اصلاح کردند [15].

$$D = -\frac{1}{\ln(N_f)} \ln(1 - \frac{n}{N_f}) \quad (۱۲)$$

از سوی دیگر در مطالعه [29] چگالی انرژی اتلافی در هر سیکل به‌عنوان شاخص خرابی در بارگذاری خستگی در نظر گرفته شده است. بر اساس آن مدل آسیب خستگی به شکل رابطه (۱۳) ارائه شده است.

$$D = -\frac{1}{\ln(E_c/d)} \ln(1 - \frac{E}{E_c}) \quad (۱۳)$$

در رابطه (۱۳)، E_c انرژی اتلافی تجمعی در زمان شکست، d_i معرف چگالی انرژی اتلافی برای یک سیکل بارگذاری و E انرژی اتلافی انباشته شده می‌باشد. با فرض اعمال چند بلوک بارگذاری، مدل آسیب به فرم رابطه (۱۴) تبدیل خواهد شد.

$$D = \sum -\frac{1}{\ln(E_c/d_i)} \ln(1 - \frac{E_i}{E_c}) \quad (۱۴)$$

در رابطه (۱۴)، d_i و E_i، به ترتیب مقدار انرژی اتلافی در هر سیکل و مقدار انرژی انباشت شده در بلوک بارگذاری iام می‌باشند. نکته قابل توجه این است که بر اساس مطالعات انجام شده مقدار E_c در همه دامنه‌های بارگذاری خستگی یکسان است؛ به عبارت بهتر مقدار E_c برای هر ماده ثابت است [30].

مدل مورد استفاده در این مطالعه مطابق رابطه (۱۵) می‌باشد که در آن اثر ترتیب و تاریخچه بارگذاری به‌عنوان دو ویژگی مؤثر در مدل آسیب خستگی در نظر گرفته شده است.

$$D_i = \frac{-1}{\ln(\frac{E_c}{d_i})}\ln(1 - \frac{(n_{i-1,e} + \Delta n_i)d_i}{E_c}) \qquad (۱۵)$$

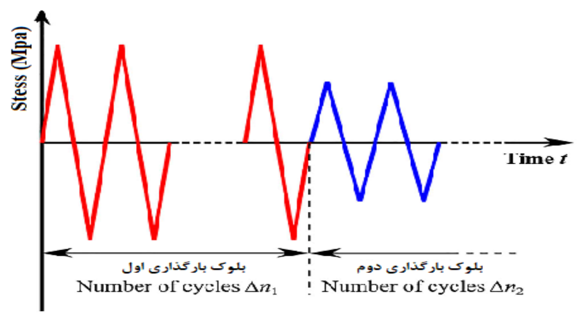
همچنین مقدار آســیب در بلوک بارگذاری $(i-1)$ام مطابق رابطه (۱۶) خواهد بود.

$$D_{i-1} = \frac{-1}{\ln(\frac{E_c}{d_{i-1}})}\ln(1 - \frac{(n_{i-1,e})d_i}{E_c}) \qquad (۱۶)$$

رابطه (۱۵) آسیب مربوط به بلوک‌های بارگذاری با دامنه متغیر را نشان می‌دهد که در آن E_c میزان اتلاف گرمایی بحرانی در زمان شکست، d_i و d_{i-1} مقدار انرژی اتلافی در هر سیکل خستگی در بلوک بارگذاری (i) و $(i-1)$ام، Δn_i تعداد سیکل طی شده در بلوک بارگذاری iام، $n_{i-1,e}$ تعداد سیکل معادل تا قبل از بلوک بارگذاری iام و D_i و D_{i-1} به ترتیب میزان آسیب در انتهای بلوک بارگذاری iام و $(i-1)$ام می‌باشند. بر اساس این دو رابطه برای به دست آوردن میزان آسیب در انتهای بلوک بارگذاری iام، کافی است دامنه بارگذاری بلوک قبل از آن را برابر دامنه بارگذاری بلوک بارگذاری iام در نظر گرفته و تعداد سیکل معادل به ازای میزان آسیب D_{i-1} را به دست آورد. به عبارت دیگر اگر دامنه بلوک بارگذاری$(i-1)$ام برابر دامنه بلوک بارگذاری (i)ام در نظر گرفته شود، باید دید به ازای چه تعداد سیکل همان میزان آسیب در انتهای بلوک $(i-1)$ام ایجاد می‌شود. با استفاده از رابطه (۱۶) می‌توان تعداد سیکل معادل را مطابق رابطه (۱۷) به دست آورد.

$$n_{i-1,e} = \frac{E_c}{d_i}\left[1 - \exp\left(-D_{i-1}\ln\left(\frac{E_c}{d_{i-1}}\right)\right)\right] \qquad (۱۷)$$

در مقاله حاضر از دو بلوک بارگذاری که دامنه آن‌ها می‌تواند متفاوت باشد استفاده شده است. بر اساس شکل (۳) اگر فرض شود بلوک بارگذاری اول Δn_1 سیکل را طی کرده باشد، در انتهای بلوک بارگذاری اول آسیب ایجاد شده معادل D_1 خواهد بود. حال برای به دست آوردن آسیب در انتهای بلوک بارگذاری دوم ابتدا باید تعداد سیکل معادل بلوک بارگذاری اول و سپس مطابق رابطه (۱۵) آسیب را در انتهای بلوک بارگذاری دوم به دست آورد.



شکل ۳ بارگذاری خستگی تحت دو بلوک بارگذاری [30]

تعریف مسئله

در این مطالعه در نظر است تا با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و زیر روال UMAT و UMATHT میزان آسیب و عمر نمونه آزمایشی در طول بارگذاری خستگی تخمین زده شود. برای این کار از نتایج مطالعه [31] بهره گرفته شده تا با استفاده از آن صحت داده‌های خروجی اعتبارسنجی گردد.

در پژوهش [31] از روش ترموگرافی برای تعیین سریع رفتار خستگی فولاد Q235 بهره گرفته شده و بر اساس آن رفتار دمایی ماده در حین بارگذاری خستگی پر چرخه و میزان آسیب خستگی طبق قاعده پالمگرن-ماینر برای پیش‌بینی عمر خستگی باقی‌مانده توسعه داده شده است.

بر ا ساس مطالعه [31] آ سیب تجمعی بر ا ساس رابطه (۱۸) برابر است با:

$$D_i = \frac{n_i}{N_{fi}} = \frac{\Delta w_i n_i}{E_c} \qquad (۱۸)$$

همچنین با فرض شرایط آدیاباتیک در ابتدای بارگذاری خستگی، مقدار انرژی اتلافی در واحد حجم (Δw_i) در هر سیکل و مقدار بحرانی انرژی اتلافی تجمعی آن بر اساس روابط (۱۹) و (۲۰) استخراج شده است.

$$\Delta w_i = \frac{\rho c \Delta T_{si}}{N_{si}} = \frac{\Delta w_i n_i}{E_c} \qquad (۱۹)$$

$$E_C = \Delta w_i N_f \qquad (۲۰)$$

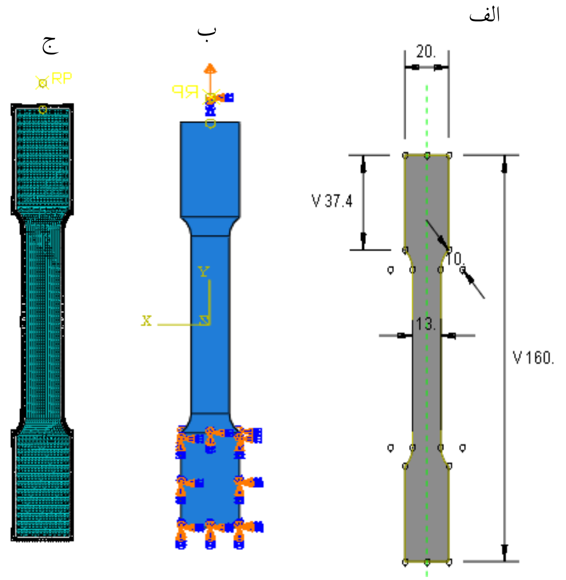
نوآوری مطالعه

از آنجا که بناست در این مطالعه بارگذاری خستگی پر چرخه با دامنه متغیر مورد بررسی قرار گیرد لذا مدل آسیب مورد استفاده در این مطالعه باید توانایی در نظر گرفتن اثر توالی بار و تاریخچه بارگذاری را داشته باشد. مدل پیشنهادی در این مطالعه اولین بار

توسط نویسندگان این مقاله ارائه شده است و قابلیت بررسی میزان آسیب در طی بارگذاری خستگی را دارد. همچنین در مطالعات پیشین، میزان انرژی اتلافی در هر سیکل تحت بارگذاری خستگی از طریق آزمایش به دست می‌آمد؛ در حالی که در این مطالعه با استفاده از زیر روال‌نویسی (زیر روال UMAT و UMATHT) و کوپل کردن دو زیر روال با یکدیگر، تحلیل تنش و تحلیل دمایی به صورت هم‌زمان انجام و آسیب بر اساس مدل پیشنهادی در هر گام به‌روزرسانی می‌شود تا در نهایت به مقدار بحرانی خود برسد.

مدل‌سازی

در این مطالعه به منظور رسیدن به اهداف مورد نظر ابتدا یک نمونه آزمایشی با ضخامت ۳ میلی‌متر مطابق شکل (۴- الف) طراحی شد. نمونه مطابق شکل(۴-ب) از انتها مقید و از سر دیگر تحت بارگذاری خستگی قرار گرفته است. همچنین از تحلیل کوپل دما- جابه‌جایی در طی ۷ گام برای استخراج همزمان دما، تنش و کرنش به‌عنوان نتایج تحلیل و المان C3D8T به تعداد ۷۷۷۶ عدد، به منظور مش‌بندی استفاده شده است شکل(۴-ج).



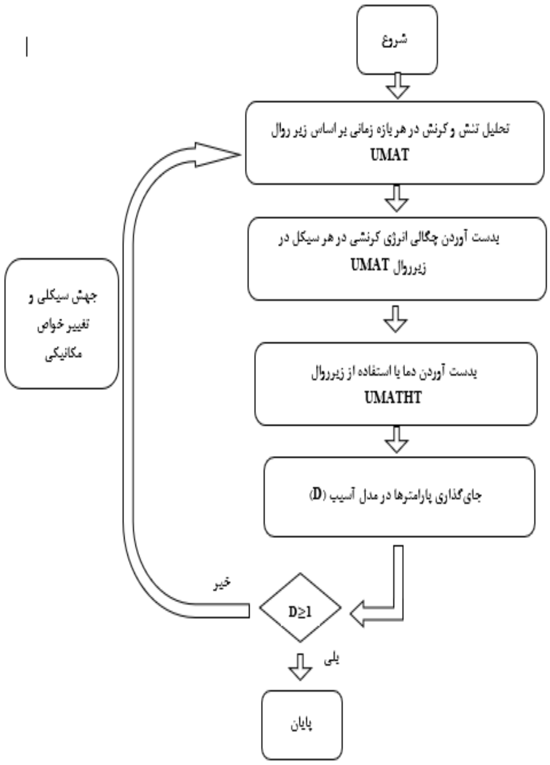
شکل ۴-الف) مشخصات ابعادی نمونه تحت بارگذاری خستگی، ب) شرایط مرزی نمونه تحت بارگذاری خستگی، ج) مش‌بندی نمونه تحت بارگذاری خستگی

روش تحلیل

مطابق شکل (۵) به منظور تحلیل تنش، کرنش و استخراج میزان انرژی اتلافی در هر سیکل از زیر روال UMAT استفاده شده است. در این زیر روال، در هر بازه زمانی ابتدا ماتریس ژاکوبین بر اساس خواص ماده و سپس مقدار تنش، کرنش، چگالی انرژی کرنشی و پارامتر آسیب مطابق رابطه (۱۵) در هر نقطه انتگرال‌گیری به دست می‌آید. پس از اینکه بازه زمانی به انتهای گام رسید ابتدا مطابق رابطه (۳)، مدول الاستیسیته اصلاح و مجددا مراحل گام زمانی قبل تکرار و به‌روزرسانی می‌شوند. از آنجا که امکان ایجاد تعداد نامحدود گام وجود ندارد بنابراین در مقاله حاضر از تکنیک جهش سیکلی استفاده شده است. لذا با ضرب هر جهش سیکلی در چگالی انرژی کرنشی در انتهای هر گام مقدار انرژی کرنشی ایجاد شده پس از طی آن تعداد سیکل به دست خواهد آمد.

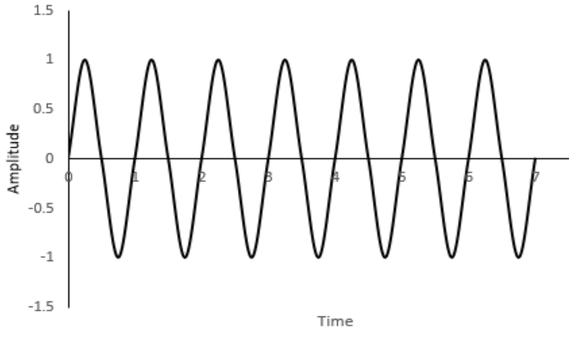
در ادامه تحلیل برای به دست آوردن دما در هر نقطه انتگرال‌گیری از زیر روال UMATHT استفاده شده است، به طوری که Δw_i به دست آمده از سابرویتن UMAT به‌عنوان انرژی حجمی تولید شده در معادله انتشار گرما در نظر گرفته می‌شود. بر اساس معادله (۱۹) میزان انرژی اتلافی در واحد حجم در هر سیکل به دمای ناحیه پایا و تعداد سیکل تا رسیدن به حالت پایا وابسته است، بنابراین با استخراج Δw_i در هر المان از طریق زیر روال UMAT، با فرض ثابت بودن تعداد سیکل تا رسیدن به ناحیه پایای دمایی در همه المان‌ها، می‌توان ΔT_{si} را با استفاده از زیر روال UMATHT در هر المان به دست آورد.

مطابق شکل (۶)، به‌منظور اعمال بارگذاری خستگی، ۷ گام زمانی ۱ ثانیه‌ای در نظر گرفته شـده اسـت، به طوری که در هر گام یک تابع هارمونیک تعریف شده که دارای یک مقدار بیشینه (+۱) و یک مقدار min (-۱) است. با ضرب مقدار تنش اعمالی در مقادیر این نمودار مقادیر بیشـینه و کمینه تنش به دسـت خوا هد آ مد. در هر گام ز مانی ابتدا م قادیر تنش و کرنش اسـتخراج و در انتهای آن گام با توجه به مقادیر تنش و چگالی انرژی کرنشی توزیع دما توسط زیر روال UMATHT به د ست می‌آید. پس از طی گام اول (ثانیه ۱) جهش سیکلی انجام شده و فرایند قبلی مجددا تکرار می‌شود.

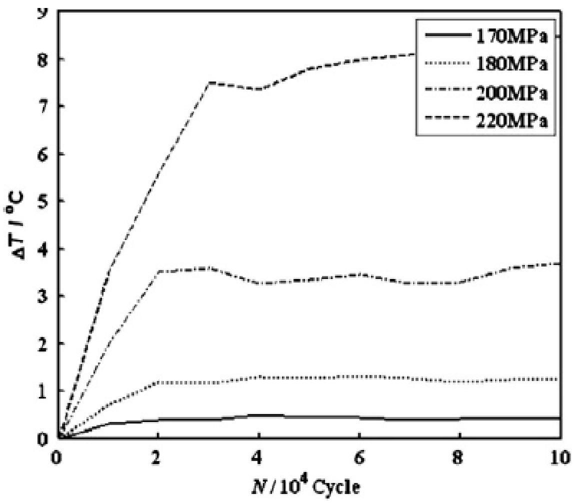


شکل ۵ الگوریتم روش تحلیل

به منظور مقایسه نتایج دو مطالعه یک نمونه استاندارد از جنس فولاد Q235 تحت بارگذاری نوسانی با نسبت تنش ۱- و فرکانس بارگذاری ۲۰ هرتز و خواص مکانیکی و حرارتی مطابق جدول ۱)، در نظر گرفته شده‌است. همان طور که در شکل نشان داده شده است در دامنه کمتر ۱۸۰ مگاپاسکال تغییر قابل توجهی در دمای ناحیه پایا مشاهده نمی‌شود. همچنین مقدار سیکل تا رسیدن به حالت پایای دمایی حدودا ۲۰۰۰۰ سیکل می‌باشد [31]. شکل (۷) میزان دمای پایا در هر دامنه بارگذاری را در داغ‌ترین نقطه نمونه نشان می‌دهد.



شکل ۴ نحوه اعمال بارگذاری خستگی



شکل ۵ رفتار دمایی فولاد Q235 تحت بارگذاری خستگی در دامنه نوسان‌های مختلف [31]

جدول ۱ خواص مکانیکی و حرارتی فولاد Q235

Material	چگالی $(\frac{Kg}{m^3})$	ضریب گرمای ویژه $(\frac{J}{Kg.℃})$	تنش تسلیم (MPa)
Q235 Steel	7850	470	235

از آنجا که در مطالعه [31] رابطه بین میزان اتلاف حرارت در هر سیکل در واحد حجم و دامنه بارگذاری خستگی مطابق رابطه (۲۱) تعریف شده است، بنابراین برای استخراج میزان انرژی اتلافی در هر سیکل در واحد حجم باید اثر دامنه بارگذاری خستگی در آن لحاظ شود.

$$\Delta w_i = \frac{\rho c}{N_{si}}(5\times 10^{-4}\sigma^2 - 15.1118) \quad (۲۱)$$

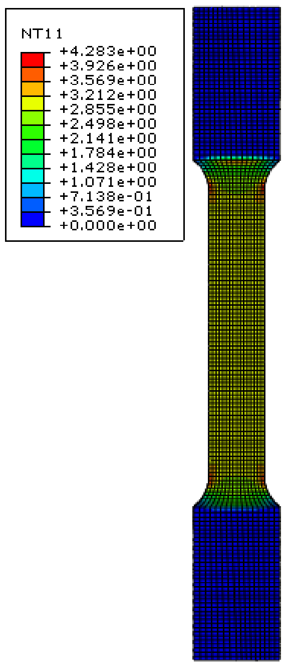
در رابطه (۲۱)، σ دامنه تنش خستگی بر حسب مگاپاسکال می‌باشد. با مقایسه نتایج به دست آمده از نرم‌افزار آباکوس و نتایج حاصل از مطالعه [31] مقدار دما در ناحیه پایای دمایی به صورت زیر مشخص شد.

جدول (۲) نشان می‌دهد که مقدار دمای پایای به دست آمده از نرم‌افزار آباکوس و مطالعه پس از گذراندن ۲۰۰۰۰ سیکل مطابقت خوبی دارند. بر اساس این جدول، می‌توان میزان اختلاف نتایج حاصل از پژوهش حاضر و مطالعه [31] را ناشی از مواردی نظیر، معین در نظر گرفتن N_{si} و استفاده از روش جهش سیکلی دانست.

جدول ۲ مقایسه دمای پایا در مطالعه حاضر و مطالعه [31] در دامنه نوسان‌های مختلف

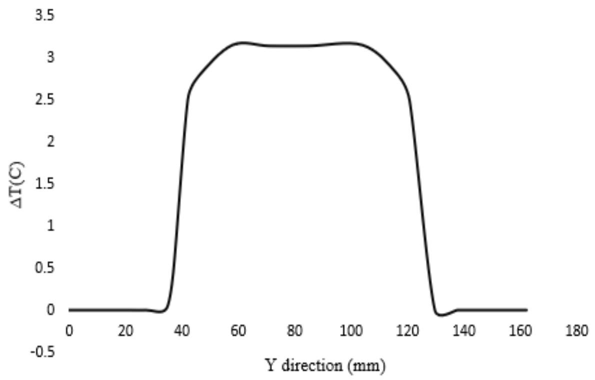
دامنه نوسان (MPa)	اختلاف دمای پایا مطابق مطالعه [31] (°C)	اختلاف دمای پایا در مطالعه حاضر (°C)
180	1.0	0.89
190	–	2.66
200	3.4	3.9
210	-	7.65
220	8.0	9.10

در ادامه میزان تغییر دما تحت بارگذاری خستگی با دامنه ۲۰۰ مگاپاسکال و نسبت تنش ۱- پس از گذراندن ۲۰۰۰۰ سیکل در شکل (۸) نشان داده شده است. بر اساس این شکل تغییر دمای وسط جسم از ابتدا و انتهای آن بیشتر است، بنابراین میزان آسیب هم در ناحیه میانی نمونه بیشتر خواهد بود. در شکل (۹) نمودار تغییرات دما در امتداد مقطع میانی نمونه از بالا به پایین نشان داده شده است.

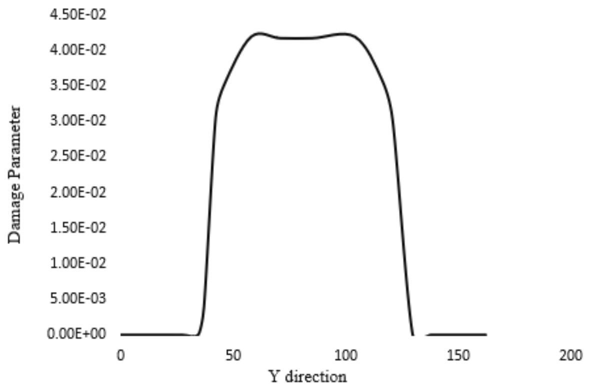


شکل ۶ کانتور دمایی فولاد تحت بارگذاری خستگی با دامنه نوسان ۲۰۰ مگاپاسکال پس از طی ۲۰۰۰۰ سیکل

بر اساس مدل آسیب مورد استفاده در این مقاله هر کجا که میزان انرژی اتلافی به ازای هر سیکل بیشتر باشد در معرض آسیب بیشتری خواهد بود. شکل (۷) تغییرات پارامتر آسیب در مقطع میانی نمونه تحت بارگذاری خستگی در ابتدای ناحیه پایای دمایی نشان می‌دهد. همچنین بر اساس این نمودار میزان آسیب ایجادشده در ابتدای ناحیه پایای دمایی کمتر از ۵ درصد آسیب نهایی منجر به شکست نمونه (مقدار آسیب بحرانی) می‌باشد.



شکل ۷ نمودار تغییرات دمایی در مقطع میانی نمونه تحت بارگذاری خستگی با دامنه ۲۰۰ مگاپاسکال در ابتدای ناحیه پایای دمایی



شکل ۸ نمودار تغییرات پارامتر آسیب در مقطع میانی نمونه تحت بارگذاری خستگی با دامنه ۲۰۰ مگاپاسکال در ابتدای ناحیه پایای دمایی

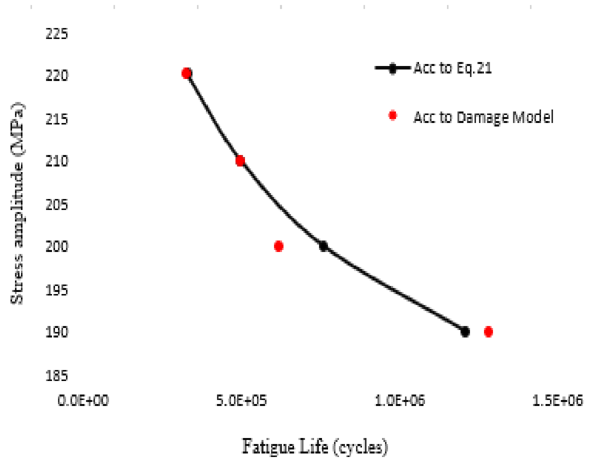
نتایج

مدل آسیب مورد نظر توانایی استفاده در دامنه نوسان ثابت و متغیر را دارد، لذا در گام اول مطابق جدول (۳)، میزان عمر خستگی در دامنه نوسان ثابت با نتایج حاصل از مطالعه [31] بر اساس رابطه (۲۲) مقایسه شد. همچنین نتایج این جدول به صورت نمودار مطابق شکل (۱۱) در ادامه ارائه شده است.

$$\log N = -8.8115 \log\sigma + 26.1602 \quad (۲۲)$$

جدول ۳ مقدار عمر خستگی در دامنه بارگذاری ثابت

دامنه نوسان (MPa)	عمر خستگی بر اساس رابطه Error! Reference source not found.	عمر خستگی بر اساس مدل معرفی‌شده
190	1.21×10^6	1.28×10^6
200	7.60×10^5	6.21×10^5
210	4.98×10^5	4.99×10^5
220	3.30×10^5	3.28×10^5



شکل ۹ نمودار مقایسه عمر خستگی با دامنه ثابت

مقایسه داده‌های جدول (۳) و شکل (۱۱) نشان می‌دهد که مدل آسیب معرفی شده در پیش‌بینی عمر خستگی با دامنه ثابت به‌خوبی عمل می‌کند. از آنجا که در این مطالعه تنها ۷ گام زمانی در نظر گرفته شده‌است، لذا مقادیر جهش سیکلی بزرگ است؛ بنابراین می‌توان گفت علت اختلاف ایجاد شده بین نتایج مطالعه [31] و مطالعه حاضر، بزرگ بودن جهش های سیکلی تعریف شده است، لذا در صورتی که تعداد گام‌ها افزایش یابد دقت نتایج بهتر خواهد شد.

همان طور که گفته شد مدل معرفی شده قادر به پیش‌بینی عمر خستگی در دامنه نوسان‌های مختلف می‌باشد. در ادامه فرض شده است که بارگذاری خستگی در دو بلوک بارگذاری، ابتدا به میزان ۲۰۰۰۰۰ سیکل با دامنه نوسان ۲۲۰ مگاپاسکال و سپس با دامنه نوسان‌های بین ۱۹۰ تا ۲۱۰ مگاپاسکال تا رسیدن به نقطه واماندگی ادامه پیدا کند. مطابق جدول (۴)، با فرض ثابت بودن میزان سیکل در دامنه نوسان ۲۲۰ مگاپاسکال، نتایج نشان می‌دهد با افزایش دامنه نوسان از ۱۹۰ تا ۲۱۰ مگاپاسکال در بلوک بارگذاری دوم عمر قطعه کاهش می‌یابد.

جدول ۴ مقدار سیکل طی شده در هر بلوک بارگذاری در خستگی با دامنه متغیر

دامنه نوسان بلوک اول (MPa)	دامنه نوسان بلوک دوم (MPa)	تعداد سیکل گذرانده شده در بلوک بارگذاری اول	تعداد سیکل گذرانده شده در بلوک بارگذاری دوم
220	190	2×10^5	5.2×10^5
220	200	2×10^5	2.8×10^5
220	210	2×10^5	1.8×10^5

یکی از ویژگی‌های این مدل در نظر گرفتن تاریخچه بارگذاری می‌باشد، به طوری که با جابه‌جا کردن دامنه بارگذاری خستگی میزان عمر خستگی تغییر می‌یابد. در جدول (۵) جای بلوک بارگذاری اول و دوم را عوض کرده و فرض شده تعداد سیکل در بلوک اول بارگذاری مطابق ستون چهارم جدول (۴) باشد. همان طور که در جدول (۵) نشان داده شده تعداد سیکل گذرانده شده در بلوک بارگذاری دوم با دامنه ۲۲۰ مگاپاسکال به ازای دامنه بارگذاری خستگی مختلف یکسان است که دلیل آن میزان آسیب یکسان تا قبل از شروع بلوک بارگذاری دوم به ازای دامنه نوسان‌های مختلف در بلوک بارگذاری اول می‌باشد.

در ادامه به مقدار آسیب ایجاد شده پس از طی دو بلوک بارگذاری با دامنه‌های متفاوت و تعداد سیکل برابر در هر بلوک پرداخته شده است. جدول (۶) نشان می‌دهد با جابه‌جا کردن ترتیب اعمال بلوک‌های بارگذاری، مقدار آسیب ایجاد شده در انتهای بلوک بارگذاری دوم تغییر می‌کند که این موضوع نشان‌دهنده حساسیت مدل آسیب معرفی‌شده به تاریخچه و ترتیب بارگذاری می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که اگر ابتدا بلوک بارگذاری با دامنه بیشتر اعمال و سپس بلوک بارگذاری با دامنه کمتر اعمال شود، میزان آسیب ایجاد شده نسبت به عکس این حالت کمتر خواهد بود.

جدول ۵ تعداد سیکل گذرانده شده در بارگذاری خستگی با دو بلوک بارگذاری

تعداد سیکل گذرانده شده در بلوک بارگذاری دوم	تعداد سیکل گذرانده شده در بلوک بارگذاری اول	دامنه نوسان بلوک دوم (MPa)	دامنه نوسان بلوک اول (MPa)
1.83×10^5	5.2×10^5	220	190
1.83×10^5	2.8×10^5	220	200
1.83×10^5	1.8×10^5	220	210

جدول ۶ تعداد سیکل و آسیب ایجاد شده در بارگذاری خستگی با دو بلوک بارگذاری

آسیب ایجاد شده	تعداد سیکل گذرانده شده در بلوک بارگذاری دوم	تعداد سیکل گذرانده شده در بلوک بارگذاری اول	دامنه نوسان بلوک دوم (MPa)	دامنه نوسان بلوک اول (MPa)
1.51×10^{-1}	2×10^5	2×10^5	200	220
2.61×10^{-1}	2×10^5	2×10^5	220	200
8.23×10^{-2}	2×10^5	2×10^5	190	220
1.56×10^{-1}	2×10^5	2×10^5	220	190
5.90×10^{-2}	1×10^5	1×10^5	210	220
6.55×10^{-2}	1×10^5	1×10^5	220	210

فهرست علائم

علائم انگلیسی

N تعداد سیکل گذرانده شده

D پارامتر آسیب

S سطح بدون آسیب

$\bar{S}$ سطح مؤثر

S_D سطح آسیب دیده

$\bar{\sigma}$ تنش مؤثر

P نیروی عمود بر سطح

W انرژی مکانیکی

Q انرژی گرمایی

ΔU انرژی داخلی

f فرکانس بارگذاری

ρ چگالی

c گرمای ویژه

T دما

t زمان

$\dot{E}_P$ نرخ تجمعی انرژی آسیب

H توان حرارتی

D_{n_f-1} آسیب بحرانی

E_c انرژی اتلافی انباشت شده بحرانی

E انرژی اتلافی انباشت شده

d چگالی انرژی اتلافی در یک سیکل

Δw_i چگالی انرژی اتلافی در یک سیکل

$n_{i-1,e}$ تعداد سیکل معادل

σ دامنه بارگذاری خستگی

N_{si} تعداد سیکل تا رسیدن به ناحیه پایای دمایی

ΔT_{si} دمای ناحیه پایای دمایی

زیرنویس

i بلوک بارگذاری

F حالت شکست

S ناحیه پایای دمایی

e معادل

بالانویس

$-$ مؤثر

واژه‌نامه

مکانیک آسیب پیوسته	Continuum damage mechanic
خستگی پرچرخه	High cycle fatigue
دامنه متغیر	Variable amplitude
پارامتر آسیب	Damage parameter
تنش مؤثر	Effective stress
باربرداری	Unloading
عمر خستگی	Fatigue life
انرژی اتلافی	Dissipated energy
گام	Step
بازه زمانی	Increment
نقطه انتگرال‌گیری	Integral Point
چقرمگی استاتیکی	Static Toughness
زیر روال	Subroutine
خودگرمایی	Self heating

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] M.A. Farsi, A.R. Sehat, " Experimental and Numerical Study on Aluminum Damage Using a Nonlinear Model of Continuum Damage Mechanics," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 27, no. 2, pp. 41-54, (2016). (In Persian). http://doi10.22067/fum_mech.v27i2.41919

[2] J. Chaboche, P. A. Lesne, "A non- linear continuous fatigue damage model", Fatigue & Fracture of Engineering *Materials & Structures*, vol. 11, no. 1, pp. 1-17, (1988). https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.1988.tb01216.x

[3] Y.-C. Xiao, S. Li, and Z. Gao, "A continuum damage mechanics model for high cycle fatigue" *International Journal of Fatigue*, vol. 20, no. 7, pp. 503-508, (1998). https://doi.org/10.1016/S0142-1123(98)00005-X

[4] J. Lemaitre, J.L. Chaboche, Mechanics of Solid Materials. Cambridge university press, (1994).

[5] J. Lemaitre, "A continuous damage mechanics model for ductile fracture", *Journal of Engineering Material and Technology*, vol. 107, no. 1, pp.83-89 (1985).https://doi.org/10.1115/1.3225775

[6] S. Chandrakanth, P. Pandey, "An isotropic damage model for ductile material", *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 50, no. 4, pp. 457-465, (1995). https://doi.org/10.1016/0013-7944(94)00214-3

[7] N. Bonora, "A nonlinear CDM model for ductile failure", *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 58, no. 1-2, pp. 11-28, (1997). https://doi.org/10.1016/S0013-7944(97)00074-X

[8] N. Bonora, "On the effect of triaxial state of stress on ductility using nonlinear CDM model", *International Journal of Fracture*, vol. 88, pp. 359-371, (1997).

[9] A. Benzerga, J. Besson, and A. Pineau, "Anisotropic ductile fracture: Part II: theory", *Acta Materialia*, vol. 52, no. 15, pp. 4639-4650, (2004). https://doi.org/10.1016/j.actamat.2004.06.020

[10] M. Mashayekhi and S. Ziaei-Rad, "Identification and validation of a ductile damage model for A533 steel", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 177, no. 1-3, pp. 291-295, (2006). https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.180

[11] A. Pirondi, N. Bonora, D. Steglich, W. Brocks, and D. Hellmann, "Simulation of failure under cyclic plastic loading by damage models", *International Journal of Plasticity*, vol. 22, no. 11, pp. 2146-2170, (2006).

https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.180

[12] A. Palmgren, "Durability of ball bearings," *ZVDI*, vol. 68, no. 14, pp. 339-341, (1924).

[13] M. A. Miner, "Cumulative damage in fatigue", *Journal of Applied Mechanics*, vol. 12, no.3, pp. A159-A164 (1945). https://doi.org/10.1115/1.4009458

[14] K. Hectors, W. De Waele, "Cumulative damage and life prediction models for high-cycle fatigue of metals: a review", *Metals*, vol. 11, no. 2, p. 204, (2021). https://doi.org/10.3390/met11020204

[15] J. Jang, M. M. Khonsari, "On the prediction of fatigue life subjected to variable loading sequence", *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 44, no. 11, pp. 2962-2974, (2021). https://doi.org/10.1111/ffe.13526

[16] G. Cheng, A. Plumtree, "A fatigue damage accumulation model based on continuum damage mechanics and ductility exhaustion," *International Journal of Fatigue*, vol. 20, no. 7, pp. 495-501, (1998). https://doi.org/10.1016/S0142-1123(98)00018-8

[17] A. Fatemi, L. Yang, "Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials", *International Journal of Fatigue*, vol. 20, no. 1, pp. 9-34, (1998). https://doi.org/10.1016/S0142-1123(98)00018-8

[18] H. Mao, S. Mahadevan, "Fatigue damage modelling of composite materials", *Composite Structures*, vol. 58, no. 4, pp. 405-410, (2002). https://doi.org/10.1016/S0263-8223(02)00126-5

[19] D. Kreiser, S. X. Jia, J. J. Han, and M. Dhanasekar, "A nonlinear damage accumulation model for shakedown failure", *International Journal of Fatigue*, vol. 29, no. 8, pp. 1523-1530, (2007).https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2006.10.023

[20] M. Amiri, M. Khonsari, "Life prediction of metals undergoing fatigue load based on temperature evolution", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 527, no. 6, pp. 1555-1559, (2010). https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.10.025

[21] M. Naderi, M. Amiri, and M. Khonsari, "On the thermodynamic entropy of fatigue fracture", *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 466, no. 2114, pp. 423-438, (2010). https://doi.org/10.1098/rspa.2009.0348

[22] Z. Lv, H.-Z. Huang, S.-P. Zhu, H. Gao, and F. Zuo, "A modified nonlinear fatigue damage accumulation model", *International Journal of Damage Mechanics*, vol. 24, no. 2, pp. 168-181, (2015). https://doi.org/10.1177/1056789514524075

[23] A. Aeran, S. C. Siriwardane, O. Mikkelsen, and I. Langen, "A new nonlinear fatigue damage model based only on SN curve parameters", *International Journal of Fatigue*, vol. 103, pp. 327-341, (2017). https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.06.017

[24] O. Plekhov, N. Saintier, T. Palin-Luc, S. Uvarov, and O. Naimark, "Theoretical analysis, infrared and structural investigations of energy dissipation in metals under cyclic loading", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 462, no. 1-2, pp. 367-369, (2007). https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.02.462

[25] R. De Finis, D. Palumbo, M. Da Silva, and U. Galietti, "Is the temperature plateau of a self- heating test a robust parameter to investigate the fatigue limit of steels with thermography?," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials*

& Structures, vol. 41, no. 4, pp. 917-934, (2018). https://doi.org/10.1111/ffe.12738

[26] S. Chhith, W. De Waele, P. De Baets, and T. Van Hecke, "On-line detection of fretting fatigue crack initiation by lock-in thermography", *Tribology International*, vol. 108, pp. 150-155, (2017). https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.10.019

[27] G. Meneghetti and M. Ricotta, "The use of the specific heat loss to analyse the low-and high-cycle fatigue behaviour of plain and notched specimens made of a stainless steel", *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 81, pp. 2-16, (2012). https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2011.06.010

[28] V. Crupi, G. Chiofalo and E. Guglielmino, "Using infrared thermography in low-cycle fatigue studies of welded joints," *Welding Journal*, vol. 89, no. 9, pp. 195-200, (2010).

[29] J. Fan, Y. Zhao, "Quantitative thermography for fatigue damage assessment and life prediction of welded components", *Mechanics of Materials*, vol. 164, p. 104120, (2022).

[30] E. Feng, X. Wang, C. Jiang and V. Crupi, "Quantitative thermographic method for fatigue life prediction under variable amplitude loading," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 45, no. 4, pp. 1199-1212, (2022). https://doi.org/10.1111/ffe.13658

[31] J. Fan, X. Guo, and C. Wu, "A new application of the infrared thermography for fatigue evaluation and damage assessment", *International Journal of Fatigue*, vol. 44, pp. 1-7, (2012). https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.06.003